

Uトラフ鋼床版に発生するデッキ貫通亀裂発見を 可能とする複合的検査方法の開発

阪神高速技術(株)技術部技術開発課 塚本 成昭
阪神高速技術(株)技術部技術開発課 山上 哲示
阪神高速道路(株)建設事業本部建設技術課 田畑 晶子

要 旨

近年、鋼床版橋梁において疲労損傷が多数報告されている。その中で、鋼床版デッキとUリブの溶接部に発生する亀裂のうち、ルート部を起点として、デッキの板厚方向に進展し、デッキを貫通する亀裂が問題視されている。この亀裂は大きく進展した場合、路面陥没の原因となり、第3者災害を引起すことがあるため、道路管理者にとって、早期発見、早期処置が求められている。しかし、この亀裂は舗装を撤去する以外に目視できないため、超音波探傷法を始めとする各種非破壊検査が実施されているが、検査効率が悪いことが課題であった。そこで、著者らは、赤外線、渦流探傷法、フェイズドアレイ超音波探傷法を組合せ、徐々に絞り込んで亀裂を発見する複合的検査方法を開発し、新浜寺大橋において発見されたデッキ貫通亀裂において適用性を確認した。

キーワード：鋼床版、疲労損傷、亀裂、赤外線、渦流探傷、フェイズドアレイ

はじめに

道路橋における鋼床版橋梁は、軽量、工期の短縮が可能であることから、湾岸線において多用されてきた。

その湾岸線鋼床版において近年、重交通や過積載車両を背景として、疲労損傷が報告されている。鋼床版の疲労損傷は図-1 に示す通り、大きく4つに分類される。

- ① デッキとUリブの溶接線に発生する亀裂
 - ② Uリブと横リブの溶接部に発生する亀裂
 - ③ Uリブの突合せ溶接部に発生する亀裂
 - ④ デッキと垂直補剛の溶接部に発生する亀裂
- 特に、①についてはUリブとデッキの溶接ルー

ト部を基点とする亀裂で、図-2 に示す通り、3つに分類される。

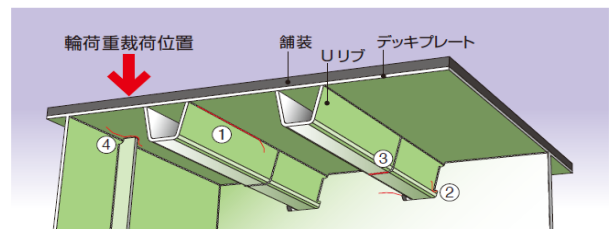


図-1 鋼床版疲労損傷一般図

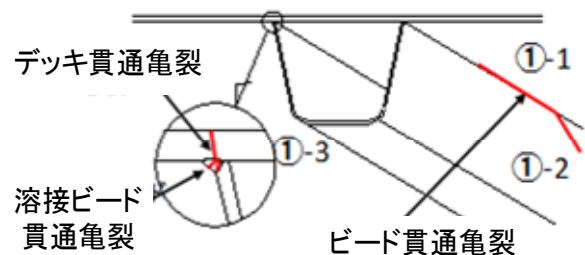


図-2 Uリブに発生する疲労損傷

- ①-1 ビード亀裂
- ①-2 ビードよりUリブ母材へ進展した亀裂
- ①-3 デッキの上に進展した亀裂

このなかで、①-3についてはデッキ上面へ亀裂が貫通し大きく進展した場合、舗装に影響を及ぼすだけでなく、局所的なデッキの耐荷力の低下を招き、路面の陥没による第三者災害の危険性を含んでいる。

そのため、鋼床版の疲労亀裂、特に①-3のデッキへ進展する亀裂（以下、デッキ貫通亀裂）を早期に発見し補修することが求められている。

このようなことから、阪神高速では鋼床版の疲労亀裂に着目した点検を実施してきた。この点検は、主に点検員による鋼床版下面からの目視によるものである。目視点検の結果異常が発見された場合、渦流探傷、磁粉探傷、超音波探傷等の非破壊検査により、詳細な確認作業を実施している。

しかし、①～④の鋼床版の亀裂のなかで、①-3のデッキ貫通亀裂は溶接ルートからデッキ上面へと進展するため、**図-3** に示す通り鋼床版下面からは目視不可能であるだけでなく、鋼床版上面からも舗装を撤去しない限り、目視不可能である。

このため、鋼床版下面からの超音波探傷による接触点検が唯一の点検方法であった。しかし、このような超音波探傷は下記の欠点を持つ。

- 鋼床版に接触する必要があるため、高所作業車または足場などの仮設備を必要とすること。
- 非常に高い高架部や、海上部においては全面足場を必要とするため、仮設備が大掛かりになること。
- 上記のような仮設備を必要とすることから、点検全体としての効率が悪いこと。



図-3 デッキ貫通亀裂
(左：下面より 右：上面より)

- 点検費用と比較して仮設備費の割合が大きく、予算上の制約を受けること。
- 点検の頻度が確立されていないが、このような点検を周期的に実施する必要があること。

このようなことから、デッキ貫通亀裂発見のため合理的かつ経済的な効率の良い、点検手法が求められていた。

そこで、著者らは合理的かつ経済的な効率の良い点検手法として、①赤外線検査手法、②渦流探傷法、③フェイズドアレイ超音波探傷法を組み合わせた、複合検査手法を開発したので報告する。

1. 赤外線検査手法

今まで報告されているデッキ貫通亀裂の多くは、下記のような特徴を持つ。

- 亀裂部の舗装が局部的に損傷する。
- 舗装損傷部から鋼床版上面へ到達した雨水が、デッキ上面から亀裂を通過し、Uリブ内部へ侵入する。
- Uリブ内部は密閉されており、侵入した雨水がUリブ内部に滞水する。

また、より特徴的なものとして、**図-4** に示す通り、Uリブ内部が満水になり亀裂よりあふれ出している事例も報告されている。



図-4 デッキ上面オーバーフロー状況

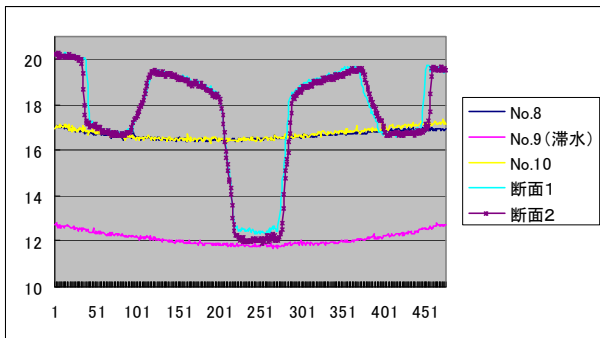
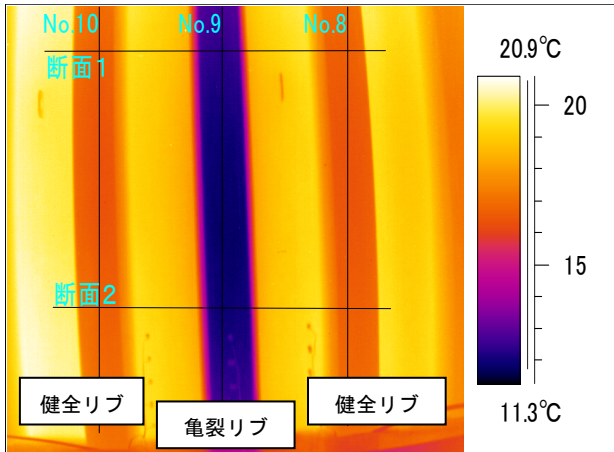


図-5 デッキ下面赤外線計測結果



図-6 赤外線計測車両



図-7 デッキ上面赤外線計測結果

このように、大きなデッキ貫通亀裂の特徴として「Uリブ内の滞水」が挙げられる。そこで今回、事前にデッキ貫通亀裂が確認されている箇所において、この「Uリブ内の滞水」に着目した鋼床版下面からの赤外線撮影による調査を実施した。

損傷が確認されたUリブは下記の通りである。

- ◆ U-320mm×260mm×6mm
- ◆ Uリブの滞水1箇所あたり延長 12m
- ◆ Uリブの滞水1箇所当たり容量 1m³

今回、著者らは赤外線検査に従来使用されていたカメラから、より高性能なカメラに換えて調査を実施した。

- 調査日時：2009年3月5日
- 調査時天候および気温：晴れ 最高14.6°C
- 使用カメラ：インジウムアンチモン型赤外線カメラ

撮影の結果図-5に示すように、デッキ貫通亀裂部は健全部と比較して約4°C～5°C低いことを確認した。

次に、Uリブ内を排水した結果、約40ℓの滞水を確認した。その後、Uリブ内の滞水を再現して路面から赤外線調査するため、このUリブ容量の約半分である600ℓを注水して調査を実施した。

ここで図-6のように、赤外線カメラを点検車両に取り付け、通常速度(約80km/h)で走行しながら、路面上を撮影した。

撮影は、動画により連続的に撮影した。図-7に、デッキ貫通亀裂部の映像を示す。全体的に鋼床版下面のUリブや横リブ等の骨組みが把握できることがわかる。また、赤く囲む範囲は、Uリブ内の滞水のためUリブが冷却され、溶接線の温度が低いことを示している。つまり、舗装の上から、Uリブの滞水が確認できることが明らかになった。これにより第1ステップ検査として効率よいデッキ貫通亀裂の1次スクリーニングが可能になる。

2. 渦流探傷法

目視できないデッキ貫通亀裂を、非破壊検査で発見しようとした場合、鋼床版上面、鋼床版下面

からの検査が考えられる。

前述の通り、鋼床版下面からの調査は仮設備の関係上、効率が悪い。一方で舗装上面から、鋼床版に非接触でデッキ貫通亀裂を検出することが可能となれば、高い効率化が図られることから、舗装上面からの検査手法を検討した。

検討した非破壊検査の特徴を図-8に示す。

舗装の上からの検査は舗装厚分だけが非接触となることから、非接触量（以下、リフト）が大きくても検査可能な渦流探傷に着目した。

渦流探傷法は、非接触検査法として発電所やプラント等の熱交換器の細管の検査に実績がある。

図-9に示す通り、細管の中を2m/s以上の速度で、非接触により亀裂や腐食の検査をしている。

この渦流探傷の技術を応用した検査手法の開発を実施した。開発に当たり下記の問題点があった。

- ◆ 従来の渦流探傷対象は軸対称構造である一方、鋼床版は平面構造であること。
- ◆ リフト量が舗装厚の最大 80mm 程度と、従来の渦流探傷と比較して非常に大きいこと。
- ◆ 舗装が渦流探傷の磁場の形成に与える影響が不明であること。

[非破壊検査機器概要]			
方式		表面亀裂	裏面亀裂
渦流探傷	非接触 リフト大	OK	NG
フェーズドアレイ	接触 画像処理	OK	OK
連続磁気飽和	非接触 リフト小	OK	OK

図-8 非破壊検査手法比較図

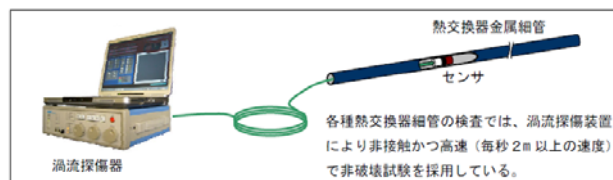


図-9 渦流探傷法一般図

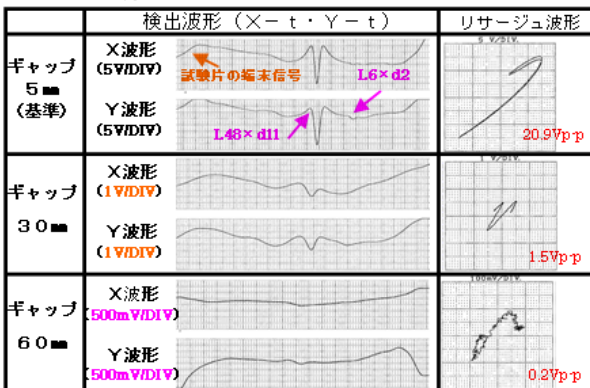


図-10 渦流探傷法一般図

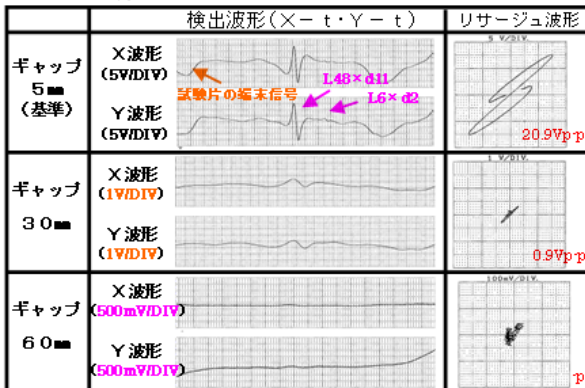


図-11 渦流探傷室内試験状況

<ABS コイル>



<DIF コイル>



<ABS コイル>

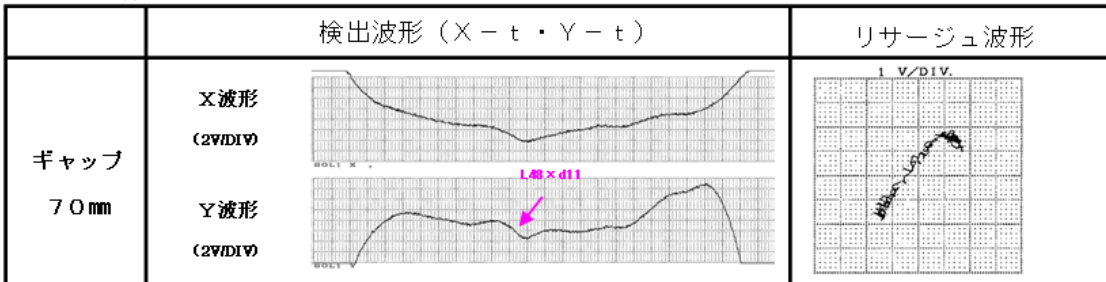


図-12 室内空間リフトオフ試験結果

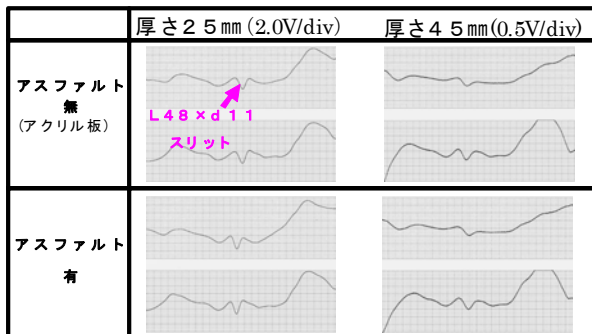


図-13 室内舗装リフトオフ試験結果



図-14 現地空間リフトオフ試験状況

これらの問題を解決するため、次のステップで開発を実施した。

- SETP 1 室内試験（空間リフトオフ試験）
- SETP 2 室内試験（舗装リフトオフ試験）
- SETP 3 現地試験（空間リフトオフ試験）
- SETP 4 現地試験（実舗装上からの試験）

2-1 室内試験（空間リフトオフ試験）

鋼床版と同様の $t=12\text{mm}$ の鋼板に幅 0.5mm、長さ 10cm の人工亀裂を入れた供試体を作成し、亀裂の検出実験を実施した。図-10 に示すように、渦流探傷機はセンサーコイルを横に並べた DIF タイプと上下に並べた ABS タイプを作成し、比較検証を行なった。

亀裂の検出実験は図-11 に示す通りリフト量を 5mm から開始し、70mm までで実施した。

検出結果の波形データを図-12 に示す。リフト量が大きくなるにつれ、DIF タイプは検出感度が低下する傾向となり、70mm では検出できなかった。ABS タイプは 70mm のリフト量でも検出できる結果となった。このことから、適用するセンサーは ABS タイプとした。

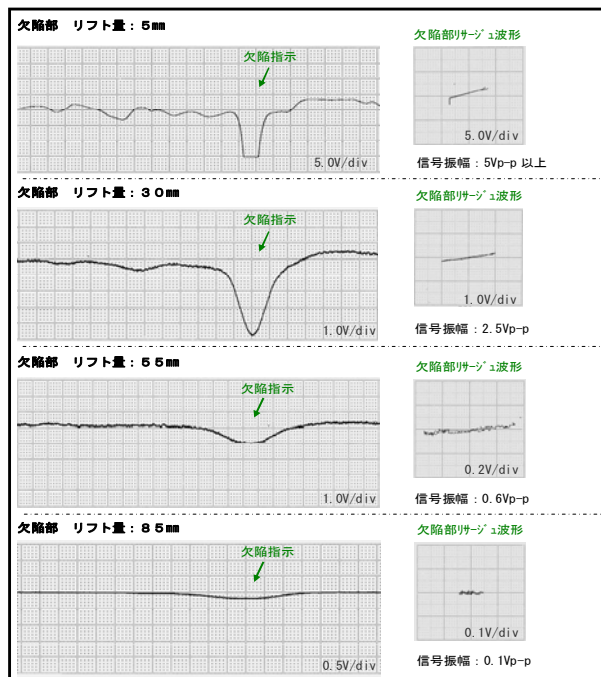


図-15 現地空間リフトオフ試験結果

2-2 室内試験（舗装リフトオフ試験）

実際の橋梁での亀裂検出時の舗装の影響を把握するために、前項の実験で作成した亀裂供試体に厚み 20mm、40mm の舗装ブロックを置き、リフト量 25mm、45mm の検出実験を実施し、舗装の影響を比較検証した。

検出結果の波形データを図-13 に示す。舗装の影響を比較した結果、影響なしと判断できた。

2-3 現地試験（空間リフトオフ試験）

図-14 に示す通り、阪神高速で舗装補修時に発見されたデッキ貫通亀裂において、渦流探傷法による検出実験を実施した。発見された亀裂は全長 245mm であった。

検出実験は、リフト量を 5mm、30mm、55mm、85mm で実施した。結果を図-15 に示す。

舗装相当分のリフト量があっても、亀裂検出が可能であることを確認した。しかし、リフト量が 85mm になると、検出感度が低下するため、センサーの改良を図ることとした。

2-4 現地試験（実舗装上からの試験）

前項の検出実験を実施、その後の舗装工事終了



図-16 現地試験状況

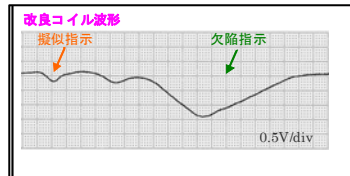


図-17 検出波形

の後、改良したセンサーを使用した実舗装上より検出実験を実施した。この橋梁は舗装厚が 65mm のため、アクリル板を含め 70mm のリフト量での図-16 に示す検出実験を行なった。その結果、図-17 に示す亀裂の波形を得ることができた。

このことから、赤外線による 1 次スクリーニング調査を受けて第 2 ステップとして、渦流探傷を使用して、舗装上よりデッキ貫通亀裂を検出できることを確認した。これにより、舗装上からのデッキ貫通亀裂の有無を効率よく調査できる。

なお、改良したセンサーの検出限界は亀裂長 100mm、最大リフト量 85mm である。

3. フェイズドアレイ超音波探傷法

第 1、第 2 ステップにより発見された鋼床版デッキ貫通亀裂の、亀裂長や亀裂深さなど、正確に計測するためには、第 3 ステップの超音波探傷法による非破壊検査が必要である。この検査は図-18 に示すように鋼床版下面からの接触検査であるが、下記の問題点がある。

- 探傷部から亀裂に対して、角度を持つこと。
- 亀裂高さが小さい（概ね板厚の 1/2）場合、表面波の影響で精度よく検出できない。

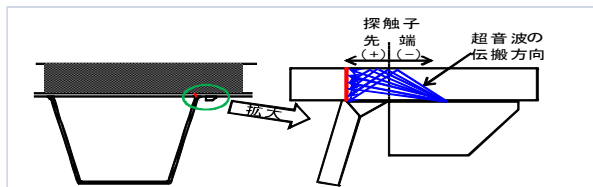


図-18 デッキ下面からの超音波検査図



図-19 フェイズドアレイ探傷器

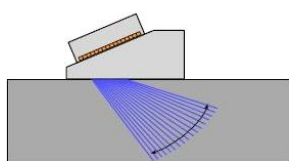


図-20 セクターキャン図

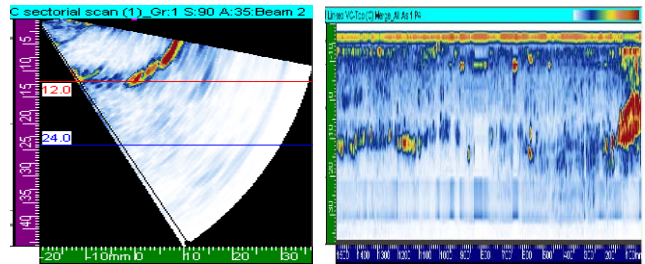


図-21 フェイズドアレイ出力例

(左 : S スキャン図 右 : B, C スキャン図)

さらに、従来の超音波探傷法の課題として下記の点が知られている。

- 塗膜の影響が大きいため、塗膜除去を要する。
- 探傷結果が複雑な波形データで、判定に相当の熟練した技術を要すること。そのため、一般の橋梁技術者が理解困難なこと。
- 記録性が低く、定量的な検出結果の記録および再現性が困難なこと。

このようなことを解決するため、近年原子力分野やプラント分野において活用されている、図-19 に示すフェイズドアレイ超音波探傷（以下、フェイズドアレイ）に着目した。

フェイズドアレイの特徴を下記に示す。

- 1 つの探触機（プローブ）に複数の探触子（エレメント）が並べられている。
- この探触子は、自在に超音波の焦点を制御できる。特に、プローブを動かすことなく、高速に連続的に放射状の探傷（セクタースキャン）が可能になること（図-20）。
- 塗膜を除去することなく、高精度な検査が期待でき、効率化が期待できること。特に、現出限界の向上が期待できること。
- 得られた探傷結果が、図-21 に示す断面図（S スキャン）や平面図（B, C スキャン）として出力することができる。
- 機種により、エンコーダを取り付けることができ、探傷結果に座標を付加することが可能となり、記録できること。
- A スキャンと比較して、可視化され判定が容易なこと。また、一般の橋梁技術者にも理解容易なこと。

このようなことから、デッキ貫通亀裂の超音波

探傷法としてフェイズドアレイを適用検討した。

3-1 プロブの選定

適用にあたり事前に、10MHz と 5MHz プロブについて亀裂供試体を作成し塗膜の影響、亀裂高さの検出限界を検討した。その結果、塗膜除去することなく、亀裂高さ 4mm (板厚の 1/3) を検出できた、5MHz プロブを選定した。

3-2 疲労試験供試体での検証

次に鋼床版の疲労試験供試体に発生したデッキ未貫通の亀裂に対して、フェイズドアレイ検査を実施した。その後サンプリングした亀裂の破壊断面から、各断面の亀裂高さを計測し、比較検証した。

その結果、表-1 に示す通り、大きな誤差なく、実用上問題なしと判断することができた。

3-3 実デッキ貫通亀裂での検証

第2章の渦流探傷で述べた、阪神高速で発見さ

れたデッキ貫通亀裂を対象として、デッキの上面および下面から亀裂を詳細に計測した。

このデッキ貫通亀裂の補修時に、亀裂の詳細調査およびフェイズドアレイの精度検証を目的とし、亀裂のサンプリングを実施した (図-22)。このサンプリングした亀裂の破壊検査結果とフェイズドアレイの結果を比較検証した。その結果、大きな誤差なく、実用上問題なしと判断することができた。

4. まとめと今後の課題

今回開発し検証した第1ステップ～第3ステップの3つの検査方法により次のような検査が可能となる。

表-1 亀裂高さ比較表

計測断面	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬
フェイズドアレイ 推定亀裂高さ	なし	3.1	3.5	2.9	3.0	2.3	3.0	3.1	3.1	2.3	2.8	2.9	2.6
断面試験 亀裂高さ (止端)	なし	3.5	3.3	3.4	3.8	3.9	3.4	4.0	4.4	3.7	3.3	3.6	2.8
差 推定値-実測値	0	0.4	-0.2	0.5	0.8	1.6	0.4	0.9	1.3	1.4	0.5	0.7	0.2

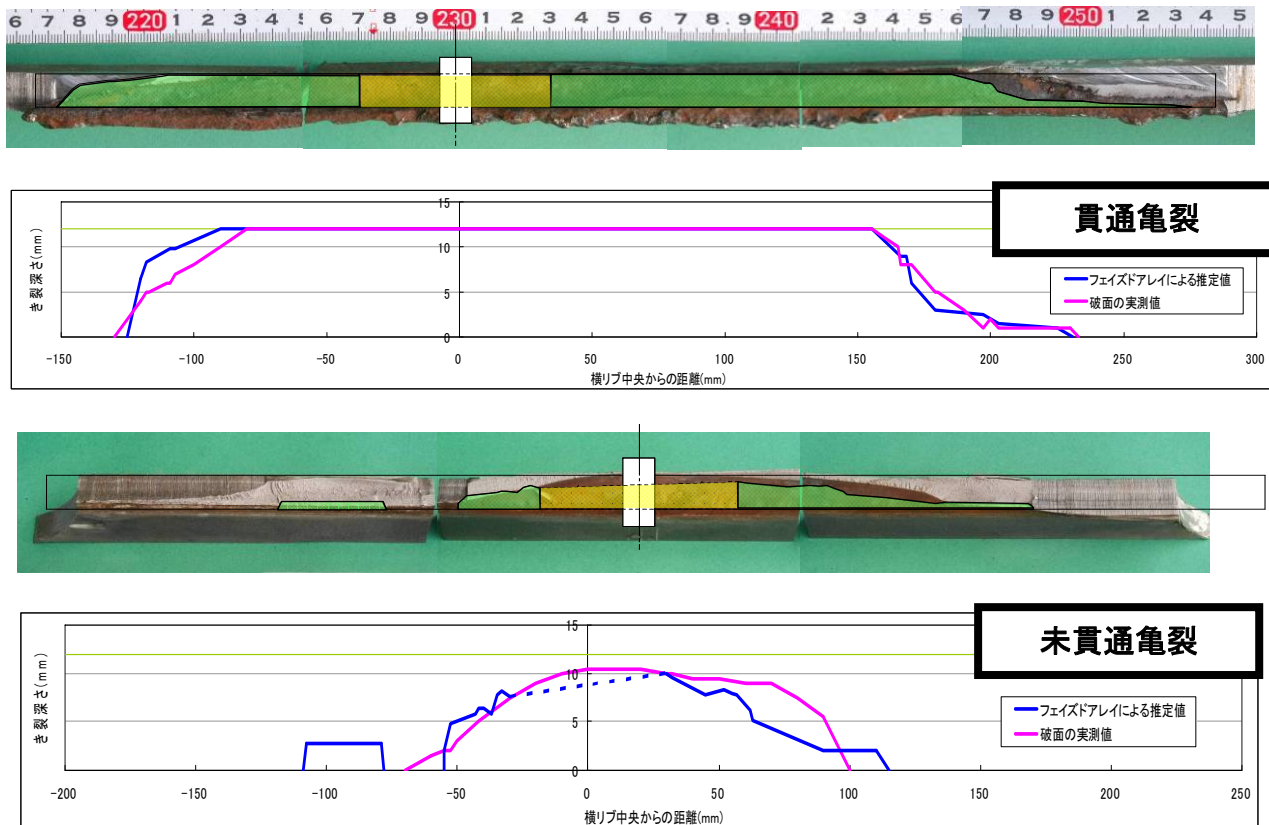


図-22 サンプリングした亀裂の破壊検査によるフェイズドアレイとの比較図

- ① 第1ステップとして、車両に搭載した赤外線カメラを使用した、舗装上からの高速走行での赤外線調査（スクリーニング）。
- ② 第2ステップとして、スクリーニングの結果抽出された箇所の渦流探傷による簡易判定。
- ③ 第3ステップとして、簡易判定によりデッキ貫通亀裂と判定された箇所の鋼床版下面からのフェイズドアレイによる詳細調査。

このように、広く浅い検査から、徐々に狭く深く絞り込むことにより、合理的かつ経済的な検査ができる。

今後重交通や累積交通量の増大により、疲労亀裂の多発が予測される。それに対し、今回開発した手法は、経済的かつ効率的な点検手法として有効であると考えられる。

今後、点検データの蓄積を進め、検出限界および検出精度の向上を図りたい。

参考文献

- 1) 山上, 塚本, 田畑: 渦流探傷法による舗装上からの鋼床版貫通亀裂の検出, 第41回技術研究発表会, pp.379-384, 平成21年5月
- 2) 塚本, 山上, 深川: 新浜寺大橋における赤外線画像データとデッキ貫通亀裂との関連性, 第41回技術研究発表会, pp.385-390, 平成21年5月
- 3) 塚本, 山上, 林田, 田畑: 鋼床版デッキ貫通亀裂発見を目的とする複合的検査手法の開発, (社)土木学会, 第64回年次学術講演会講演概要集, 6-346, pp.691-692, 平成21年9月
- 4) 杉山, 崎谷, 小林, 田畑, 山上, 塚本, 高村: フェイズドアレイ超音波探傷を用いた鋼床版デッキプレート貫通亀裂調査, (社)日本道路協会, 日本道路会議, 第28回, 40011, 平成21年10月
- 5) 田畑, 山上, 塚本, 奥野, 河野: 渦流探傷試験による鋼床版き裂検出に関する報告, (社)日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, 第17巻, 報告, pp.315-322, 平成21年11月
- 6) 杉山, 崎谷, 小林, 高村, 塚本: 鋼床版デッキプレート貫通亀裂の詳細調査および補修設計, (社)日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, 第17巻, 報告, pp.345-350, 平成21年11月
- 7) H.Sugiyama, A.Tabata, S.Tsukamoto: Development of a Compound Inspection Method to Detect Fatigue Damages on Orthotropic Steel Deck, pp.2022-2029, IABMAS2010, 2010.7

DEVELOPMENT OF A COMBINED INSPECTION METHOD TO DETECT THROUGH FATIGUE CRACKS IN AN ORTHOTROPIC STEEL DECK WITH U-SHAPED RIBS

Shigeaki TSUKAMOTO, Tetsuji YAMAGAMI and Akiko TABATA

Fatigue damage in steel orthotropic deck bridges has been frequently reported in recent years, including cracks in welds between a deck plate and U-shaped ribs. Cracks initiating at the weld roots, developing in the thickness direction and eventually penetrating the deck plate are serious problems to road administrators because they may cause road surface settlement and consequently harm to the third parties once grown to a considerable extent. Although early detection and treatment are extremely important, these cracks are not visible without removing surface pavement. Ultrasonic and other non-destructive tests have been used for their detection, but only inefficiently. The Hanshin Expressway Group developed a combined method using infrared, eddy current and ultrasonic phased array techniques and verified its applicability on the Shin-Hamadera Bridge by detecting actual through cracks previously found in the bridge.

塚本 成昭



阪神高速技術株式会社
技術部 技術開発課
Shigeaki Tsukamoto

山上 哲示



阪神高速技術株式会社
技術部 技術開発課
Tetsuji Yamagami

田畑 晶子



阪神高速道路株式会社
建設技術本部 建設技術課
Akiko Tabata